

# 一次暴雪天气的数值模拟及诊断分析

张广周<sup>1,2</sup> 沈桐立<sup>1</sup> 李 戈<sup>2</sup> 张润琼<sup>3</sup> 朱丽娜<sup>1</sup> 白家惠<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学大气科学学院, 210044;  
2. 河南省平顶山市气象局; 3. 贵州省六盘水市气象局)

**提 要:** 采用 MM5 中尺度数值模式对河南省 2006 年 1 月 18—19 日的暴雪天气过程进行了数值模拟, 利用模式输出的时空分辨率较高的资料, 对此次降雪的水汽条件、温度条件、不稳定条件、风场等进行了分析。结果表明: 中低层水汽的辐合作用是暴雪天气发生的必不可少的条件; 河南省上空逆温层的上界对应西南气流, 下界对应东北气流, 这种流场配置对降雪最有利; 高低空急流的稳定维持使高低空急流产生两个独立的次级环流, 在高空急流出口区, 间接环流的北部形成辐合上升气流, 十分有利于降水天气的发生发展; 总螺旋度的变化对降雪的强度变化有一定的指示意义; 对湿位涡这一物理量的分析发现, 与暴雨过程中起主导地位的 MPV1 不同, MPV2 在这次降雪过程中作用大于 MPV1。

**关键词:** 暴雪 数值模拟 诊断分析

## Numerical Simulation and Diagnostic Analysis of a Heavy Snow Process

Zhang Guangzhou<sup>1,2</sup> Shen Tongli<sup>1</sup> Li Ge<sup>2</sup> Zhang Runqiong<sup>3</sup> Zhu Lina<sup>1</sup> Bai Jiahui<sup>1</sup>

(1. Institute of Atmospheric Science, NUIST, Nanjing 210044;  
2. Pingdingshan Meteorological Office of Henan Province; 3. Liupanshui Meteorological Office of Guizhou Province)

**Abstract:** MM5 model is used to simulate the process of snowstorm in Henan Province from January 18<sup>th</sup> to 19<sup>th</sup> in 2006. High space-time resolution data from model output are imposed to analyze vapor, temperature, instability, wind and other conditions of this process. Results show that the convergence of middle-low layer vapor is absolutely necessary condition. It is most favorable for snowstorm that upper boundary of inversion layer over Henan Province corresponds to southwest jet flow and lower boundary corresponds to northeast jet flow. The steady maintaining of high-low jet flow generated two separate secondary circumfluence and the north of indirect circumfluence formed convergence ascending air at the exit of upper-level jet flow. This situation quite favor

the generation and development of precipitation. Total helicity changes have the significant indication to changes of snow intensity. Moist potential vorticity was analyzed to find that MPV2 is more important than MPV1 in this event, whereas in the case of rainstorm, MPV1 plays a dominant role.

**Key Words:** snowstorm numerical simulation diagnosis analysis

## 引 言

暴雪是河南省主要灾害性天气之一。对于冬季暴雪,国内外亦有不少研究。国外主要针对雪暴做了不少的研究,如 1979 年 2 月 18—19 日美国的总统日雪暴<sup>[1]</sup>,1996 年 11 月俄亥俄州的雪暴<sup>[2]</sup>等,它们大多与温带气旋的形成和发展有关。在亚洲的日本,降雪也多与低压系统的发生发展有关。我国对暴雪的研究也已经有一定的工作基础,王文辉等<sup>[3]</sup>在 1979 年曾对暴雪个例进行了天气学分析,得出一些有益的结论;王东勇等<sup>[4]</sup>认为黄淮暴雪过程中其近地面 925hPa 附近伴有强烈的超低空急流;宋志平等<sup>[5]</sup>首次利用 GRAPES 全球数值模式对华北一次大一暴雪过程进行了成功的数值模拟试验;李加洛等<sup>[6]</sup>利用 Q 矢量方法对青海东部一次强暴雪天气过程进行了诊断分析;张迎新等<sup>[7]</sup>研究表明华北回流降雪的开始和结束与高低层的风向有关。

河南的气象工作者也从天气分型的角度进行了分析研究<sup>[8-9]</sup>。2006 年 1 月 17—20 日,河南省出现了持续性大范围降雪,这是一次典型的华北东路冷空气影响造成的暴雪天气过程。本文以该天气过程为例,利用数值模式 MM5V3.7 对可能导致这次暴雪天气形成的若干物理因子进行诊断分析,以期对暴雪天气的预报提供参考。

## 1 天气概况和形势分析

### 1.1 天气过程概述

2006 年 1 月 17—20 日江南、江淮及黄

淮大部分地区先后出现雨雪天气,河南省的大部分地区出现了暴雪,最大降雪中心出现在舞钢。从 17 日 20 时至 19 日 20 时,舞钢的降雪量为 37.4mm,其中 18 日 08 时到 19 日 08 时降雪量为 24mm,超过历史次大值(历史最大极值为 26.4mm),积雪深度为 32cm,超过历史最大雪深(26cm)。这次降水过程从 1 月 17 日 20 时开始,18 日的白天到夜里最大,到 19 日的夜里基本结束。期间河南省大部分地区的平均气温普遍下降 7℃左右。暴雪过后的积雪、结冰和降温,严重影响了交通运输和安全,给广大人民的生活和工农业生产带来极大影响和危害。

### 1.2 形势分析

过程期间,欧亚大陆 500hPa 上空为稳定的两槽一脊形势。—44℃线的冷温槽区位于俄罗斯东部的雅库茨克到东亚沿海的北部岛,另一—44℃线的冷温槽区位于乌拉尔山到里海、咸海一带;槽中不断分裂冷空气南下影响我国。同时,从南海到我国的西南地区维持一南支槽,河南省处于该南支槽前的西南暖湿气流里。冷暖空气交汇,在河南省形成了这次暴雪天气过程。

700hPa 图上(图略),17 日 20 时,在陕西境内有一暖式切变,该切变线配合其东南侧的西南风急流不断加强东移南压影响河南省,19 日 08 时该暖式切变逐渐达到最强,其两侧的南阳站和武汉站风速达最大,分别为东南风  $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  和西南风  $20\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。暖切变和西南风急流不仅为这次暴雪天气过程提供了充沛的水汽,而且增加了辐合。19 日 20 时以后,该暖切变逐渐减弱北抬并转竖,两侧

的风速大大减小,西南风急流抵达东南沿海地区,这次连续性暴雪天气过程逐渐结束。

850hPa图上(图略),河南省一直处于东北气流里。从850hPa到700hPa出现了逆温层,700hPa强盛的偏南暖湿气流叠加在850hPa干冷的东北气流之上,加大了垂直切变,促使上升运动的加强和暴雪天气过程的发生、发展。

地面图上,过程期间从蒙古国西部到我 国东北地区维持一冷高压,河南省处于冷高压底部的东北气流里。

## 2 模拟方案与降水模拟分析

### 2.1 模拟方案

本文利用2006年1月17日20时至19日20时每6小时的NCEP再分析资料(水平分辨率 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ )和对应时间的探空、地面资料,采用MM5模式对这次暴雪过程进行数值模拟,积分48小时。网格点结构采用双重嵌套,区域中心为 $34^{\circ}\text{N}$ 、 $113^{\circ}\text{E}$ ,粗、细网格格距分别为60km和20km,网格点数均为 $61 \times 61$ 。垂直层数23层,模式顶气压100hPa。动力学过程采用流体非静力平衡方案,模式粗网格采用Betts-Miller积云对流参数化方案,细网格采用Grell积云对流参数化方案。两重网格均采用MRF的边界层方案,微物理过程采用Goddard降水显式方案。

### 2.2 降水模拟分析

图1是实况和模式输出的18日08时至19日08时24小时主要降水时段累积降水量分布图。可以看出,细网格较好地模拟出了河南省降水区走势和南北两个暴雪降水中心位置,而且小一中雪、大一暴雪区域及走势基本与实况吻合,只是模拟的南、北两个降水中心强度稍小于实况,因此可以认为MM5对这次暴雪过程有较强的模拟能力。用模式

输出的细网格动力协调资料来进行这次暴雪的诊断分析,能够反映这次暴雪天气过程影响系统的发展演变及动力机制。

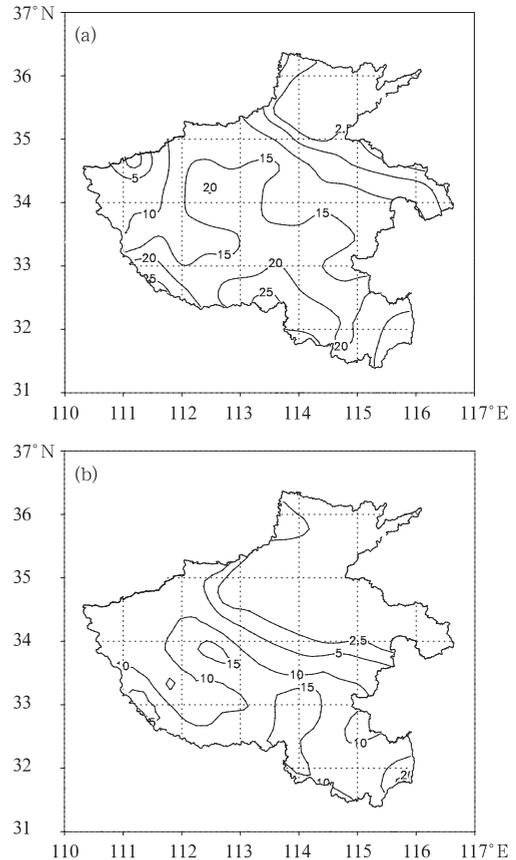


图1 2006年1月18日08时—19日08时  
降水分布图(单位:mm)

(a) 降水实况分布图;(b) 模拟的降水分布图

## 3 模拟结果诊断分析

### 3.1 次级环流分析

高低空急流的稳定维持使低空急流和高空急流耦合产生两个独立的次级环流。在高空急流出口区,产生一个间接环流,这样在间接环流的北部形成辐合上升气流,十分有利于降水天气的发生和发展。分析模拟输出的每3小时一次全风速以及经向风与垂直速度

合成的垂直环流沿  $113^{\circ}\text{E}$  经向高度剖面图(图 2)发现,18 日 02 时,高空急流中心在 250 至 200hPa 之间  $30^{\circ}\text{N}$  附近的区域,中心风速达  $65\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。该高空急流不断加强北抬,于 18 日 14 时到达  $31.5^{\circ}\text{N}$  与  $32^{\circ}\text{N}$  之间。中心风速达到  $70\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。之后,该高空急流不断南压,于 19 日 08 时到达  $30^{\circ}\text{N}$  附近,且在  $30^{\circ}\text{N}$  附近徘徊,此时低空急流已形成并稳定维持,河南省上空处于高低空急流出口区北侧的倾斜上升气流中,十分有利于这次暴雪天气过程的发生、发展。期间  $34^{\circ}\text{N}$  以南区域这种倾斜上升气流于 18 日 11 时开始逐渐加强并维持到 19 日 08 时,河南省上空

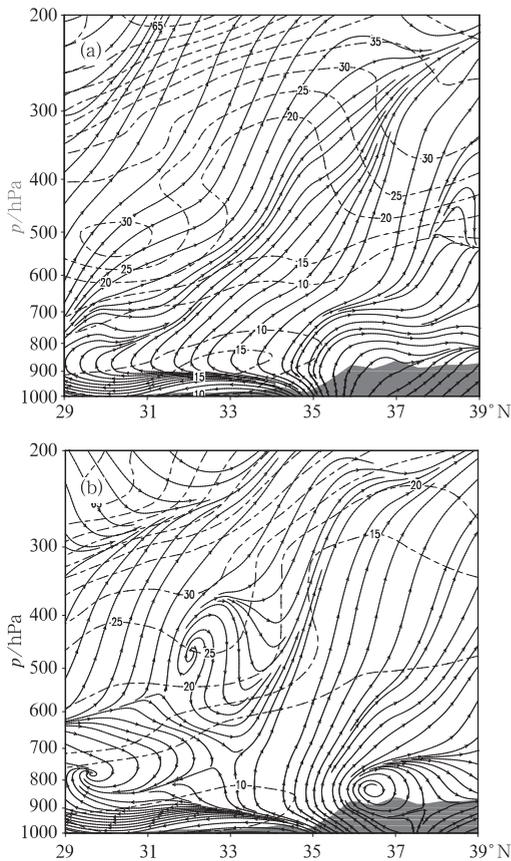


图 2 经向风与垂直速度合成的垂直环流沿  $113^{\circ}\text{E}$  经向高度剖面图  
(虚线:全风速,单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

(a) 2006 年 1 月 18 日 14 时; (b) 2006 年 1 月 19 日 17 时

倾斜上升气流发展强盛阶段与降雪集中时段吻合。此后,在  $33^{\circ}\text{N}$  附近区域的中层开始出现倾斜下沉气流,并于 19 日 20 时,该倾斜下沉气流扩展到  $34^{\circ}\text{N}$  以南的宽广区域,这次降雪天气过程结束。

### 3.2 温度场分析

降雪形成条件比降雨复杂,主要是因为温度条件不同。分析模拟输出的每 3 小时一次的温度场沿  $113^{\circ}\text{E}$  经向垂直剖面图(图 3)发现,从 18 日 02 时到 19 日 20 时,河南省上空 700hPa 到近地面层由北向南伸出一条冷舌,850hPa 上气温为  $-5^{\circ}\text{C}$  左右,华北冷空气所形成的“冷垫”是河南省暴雪发生的先决条件。同时在 850~750hPa 出现了逆温层,其

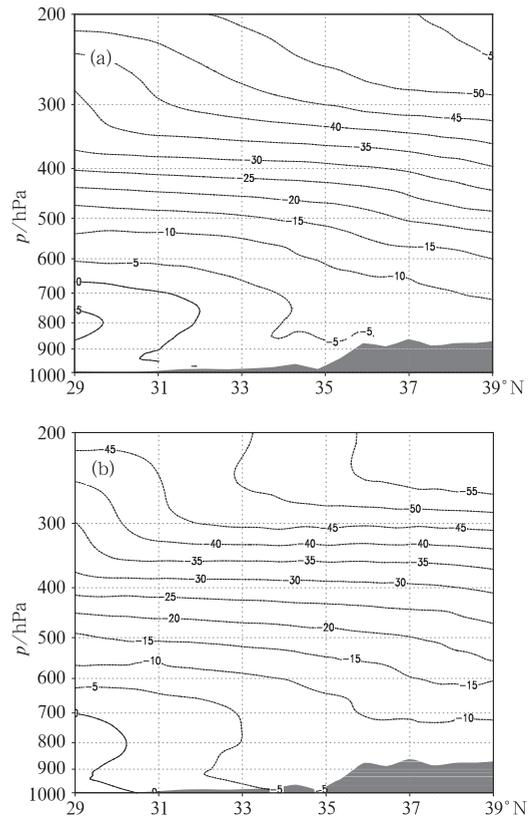


图 3 温度沿  $113^{\circ}\text{E}$  经向垂直剖面图(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

(a) 2006 年 1 月 18 日 02 时; (b) 2006 年 1 月 19 日 08 时

上界在 750hPa 附近,上部为西南气流,下界在 850hPa 附近,下部为东北气流。逆温层的上下界面正好是“天南地北”流场叠置的界面。此时,强盛的西南气流叠加在干冷的东北气流之上,加大了垂直切变,有利于上升运动的加强,这种流场配置对降雪最有利。而长江流域及其以南地区的逆温层下界在 900hPa 以下,冷空气太浅薄,且其 850hPa 上温度较高,所以在长江流域及江南地区的降水形式为雨。河南省上空冷舌、逆温层形成强盛阶段与降雪集中时段一致。从 19 日 20 时起,冷舌、逆温层逐渐减弱消失,这次暴雪天气过程趋于结束。

### 3.3 螺旋度分析

螺旋度是一个用来衡量风暴入流气流的强弱及沿入流方向的涡度分量大小的参数,是近年来引进的一个强对流预报参数,它常用于暴雨天气的物理机制的研究上。也有人把它用于暴雪的分析中,下面利用这一诊断量对这次过程做进一步的诊断分析。

分析模拟输出的每 3 小时一次的总螺旋度分布图(图 4)发现,17 日 20 时,螺旋度大值中心位于江南一带,中心值达  $400\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  以上,河南省正螺旋度值为  $0 \sim 360\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。18 日 02 时出现两个螺旋度大值中心,一个位于江南一带,另一个位于河套地区,正螺旋度中心值达  $480\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  以上,河南省正螺旋度值为  $180 \sim 480\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ 。之后,该正螺旋度大值中心不断东移、减弱,河南省正螺旋度值逐渐减少。19 日 08 时,河南省正螺旋度值为  $0 \sim 120\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  左右,19 日 20 时河南省中部、南部螺旋度值已转为负值。这说明河南省总螺旋度处于大值时段,正是暴雪降水最大期间,因此总螺旋度对这次降雪强度变化有一定的指示意义。

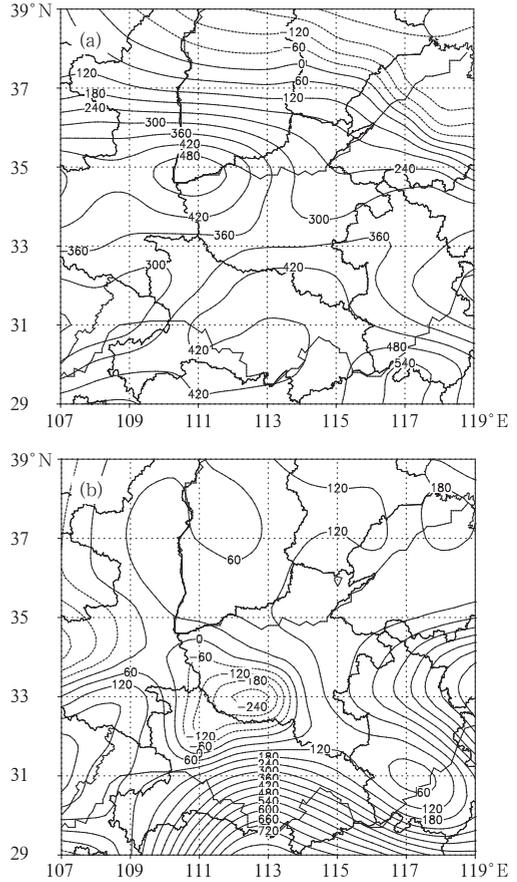


图 4 总螺旋度图(单位:  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ )

(a) 2006 年 1 月 18 日 02 时;

(b) 2006 年 1 月 19 日 20 时

### 3.4 湿位涡分析

湿位涡这一物理量不仅表征了大气动力、热力属性,而且考虑了水汽的作用<sup>[10]</sup>,所以对湿位涡进行诊断,可以寻求热力、动力及水汽条件与降水的关系,从而揭示降水发生发展的物理机制。

湿位涡的表达式为:

$$MPV = -g(\xi + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} + (g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y})$$

湿位涡分为两个部分,其中  $MPV1 = -g(\xi + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p}$ ,是空气块绝对涡度的垂直分量与熵的垂直梯度的乘积,是 MPV 的垂

直分量,  $MPV2 = g \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - g \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y}$  是风的垂直切变和湿相当位温水平梯度的乘积, 是等压面上的水平分量。

分析模式输出的每 3 小时一次的  $MPV$ 、 $MPV1$  和  $MPV2$ (图 5)沿  $34^\circ\text{N}$  纬向

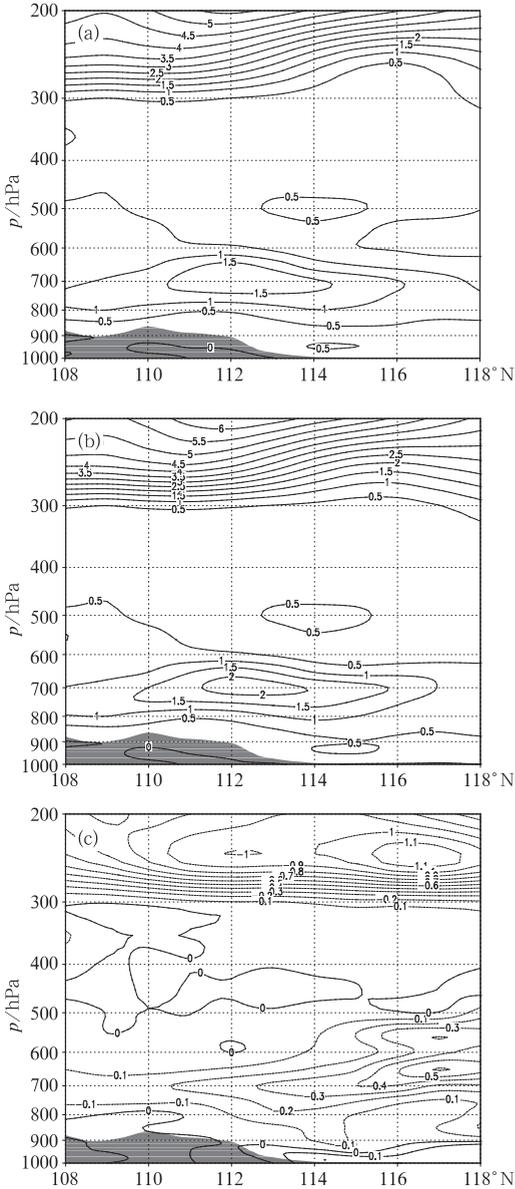


图 5  $MPV$ 、 $MPV1$  和  $MPV2$  沿  $34^\circ\text{N}$  纬向高度面图 (单位:  $\text{pvu}$ ,  $1\text{pvu} = 10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{k} \cdot \text{kg}^{-1}$ )  
(a) 2006 年 1 月 19 日 02 时  $MPV$ ; (b) 2006 年 1 月 19 日 02 时  $MPV1$ ; (c) 2006 年 1 月 19 日 02 时  $MPV2$

垂直剖面图发现, 整个过程期间, 在  $400 \sim 500\text{hPa}$  层,  $MPV$  和  $MPV1$  均为 0 值区, 说明大气处于中性状态; 而在其他层次,  $MPV$  和  $MPV1$  均为  $>0$  值区, 表示大气处于对流稳定性状态, 不利于降水天气的发生。而在  $MPV2$  图上,  $400 \sim 500\text{hPa}$  层河南省上空均为 0 值区, 其他层次,  $MPV2$  均  $<0$ , 且数值较小, 说明该区域风压场之间存在地转关系, 有利于降水天气的发生发展。所以认为在这次降雪过程中, 虽然  $MPV2$  的数值从总体上小于  $MPV1$  的数值, 但这与暴雨过程中起主导地位的是  $MPV1$  不同,  $MPV2$  在这次降雪过程作用要大于  $MPV1$ 。

从这也可看出冬季以下沉气流为主导的背景下, 暴雪过程的垂直上升运动强度要明显弱于夏季的暴雨。

#### 4 水汽条件分析

在分析模式输出的 17 日 20 时到 19 日 20 时的水汽通量沿  $113^\circ\text{E}$  经向垂直剖面图(图 6)时发现, 河南省上空  $850\text{hPa}$  以下存在来自东北方向的干冷气流, 在  $750\text{hPa}$  以上存在一支西南暖湿气流,  $600$  到  $500\text{hPa}$  之间为水汽通量大值区。分析  $500\text{hPa}$  水汽通量(矢量)分布图(图 7)可知, 18 日 08 时水汽通量大值中心位于四川省南部, 数值为  $7 \times \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ , 之后不断向东北方向输送, 并于 18 日 14 时在河南省南部达最大, 为  $8 \times \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 。19 日 02 时, 大值中心仍位于河南省南部, 中心值减小为  $7 \times \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ , 19 日 08 时水汽通量中心东移出河南省, 并于 19 日 20 时减小为  $2 \times \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 。由此可见, 在这次暴雪天气过程中, 南支槽前的西南气流把孟加拉湾的水汽源源不断地向河南省输送, 为河南省暴雪天气提供丰沛的水汽条件。

中低层水汽的辐合作用是暴雪天气发生

的必不可少的条件。分析模拟输出的每 3 小时一次水汽通量散度沿 34°N 的纬向垂直剖面图(图 8)发现:从 17 日 23 时起,河南省上空在 600hPa 附近为水汽辐合区,其上部

和

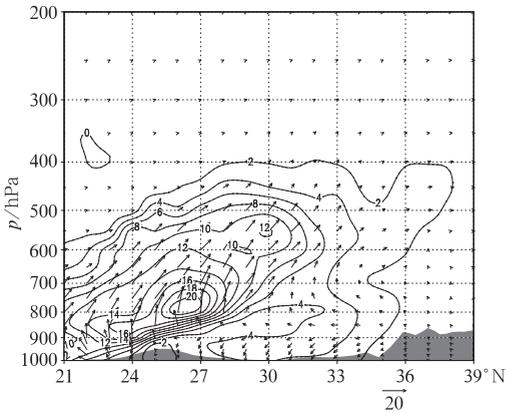


图 6 2006 年 1 月 18 日 14 时水汽通量沿 113°E 经向垂直剖面图  
单位:  $g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1}$

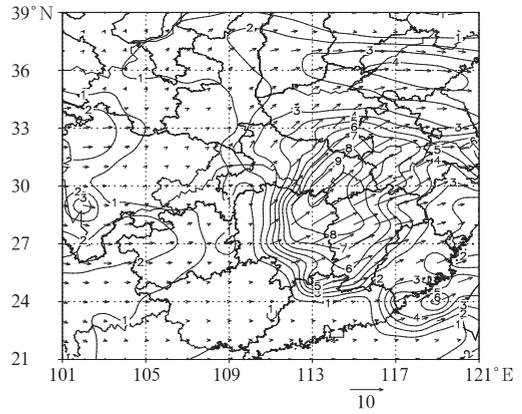


图 7 2006 年 1 月 18 日 14 时 500hPa 水汽通量图  
单位:  $g \cdot s^{-1} \cdot cm^{-1} \cdot hPa^{-1}$

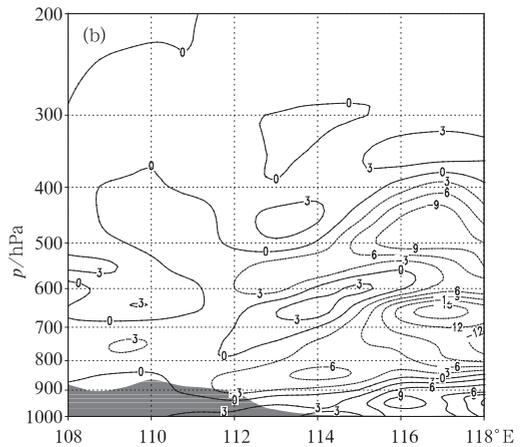
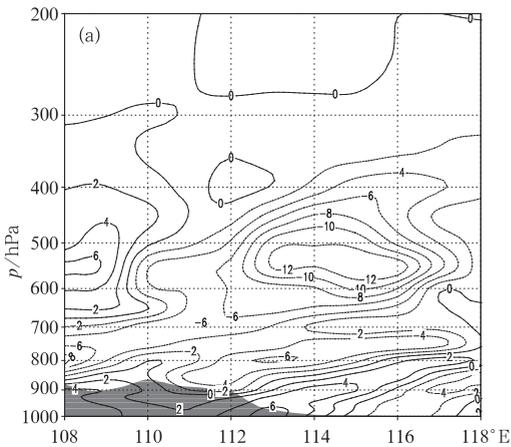


图 8 水汽通量散度沿 34°N 的纬向垂直剖面图 (单位:  $10^{-7} g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$ )  
(a) 2006 年 1 月 18 日 14 时; (b) 2006 年 1 月 19 日 08 时

下部为弱水汽辐散区。之后,水汽辐合逐渐增强,于 18 日 14 时达到最强,中心为  $-12 \times 10^{-7} g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$  以上,位于 600~500hPa 之间。此后,水汽辐合逐渐减弱,于 19 日 08 时,辐合中心减小为  $-3 \times 10^{-7} g \cdot cm^{-2} \cdot hPa^{-1} \cdot s^{-1}$ 。这说明暴雪临近时,水汽迅速聚集,暴雪发生时,在中低层有大量的

水汽集中,随着水汽聚集的减少,这次暴雪天气逐渐结束。

### 5 小 结

采用 MM5 中尺度数值模式对 2006 年 1 月 18—19 日河南省暴雪天气过程进行了数

值模拟试验,得出如下结果:

(1) MM5 对这次暴雪过程有较强的模拟能力,细网格输出的物理量能较好地揭示这次暴雪产生的机制。

(2) 暴雪临近时,丰富的水汽来源、中低层的水汽辐合、高低空急流耦合产生的上升运动以及河南省上空的冷舌、逆温层有利于降雪天气的发生发展。

(3) 对次级环流分析的模拟表明,高低空急流的稳定维持使高低空急流产生两个独立的次级环流,在高空急流出口区、间接环流的北部形成上升气流,有利于降水天气的发生发展。

(4) 总螺旋度的变化对降雪强度变化有一定的指标意义。

(5) 在这次降雪过程中,MPV2 的数值从总体上小于 MPV1 的数值,但与暴雨过程中起主导地位是 MPV1 不同,MPV2 在这次降雪过程中作用大于 MPV1。

## 参考文献

- [1] Lance F. Bosart. The President' Day snowstorm of 18-19 February 1979: A subsynoptic-scale event [J]. Mon Wea Rev, 1981, 109(7): 1542-1566.
- [2] Schmidlin, T. W. and J. Kosarik. A record Ohio snowfall during 9-14 November 1996 [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1999, 80(6): 1107-1116.
- [3] 王文辉,徐德祥. 锡盟大雪过程和“77.10”暴雪分析 [J]. 气象学报, 1979, 37(3): 80-86.
- [4] 王东勇,刘勇,周昆. 2004 年末黄淮暴雪的特点分析和数值模拟 [J]. 气象, 2006, 32(1): 30-35.
- [5] 宋志平,刘文明. 2003 华北初雪的数值模拟和诊断分析 [J]. 气象, 2004, 30(11): 3-7.
- [6] 李加洛,达成荣,刘海明,等. 青海东部一次强暴雪天气的 Q 矢量诊断分析 [J]. 气象, 2003, 29(9): 8-12.
- [7] 张迎新,侯瑞钦,张守保. 回流暴雪过程的诊断分析和数值试验 [J]. 气象, 2007, 33(9): 25-32.
- [8] 王新敏,布亚林,李平,等. 河南省暴雪天气特征及预报模型 [J]. 河南气象, 2000(4): 1-2.
- [9] 梁钰,苏爱芳. 2003 年河南省两类典型暴雪天气对比分析 [J]. 河南气象, 2004(1): 12-14.
- [10] 寿绍文,励申申,姚秀萍. 中尺度气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 2003: 276-285.
- [1] Lance F. Bosart. The President' Day snowstorm of